

УДК 524.352-13

ПРОГРЕСС В ИССЛЕДОВАНИЯХ СВЕРХНОВЫХ С ПОМОЩЬЮ 2.5-М ТЕЛЕСКОПА КАВКАЗСКОЙ ГОРНОЙ ОБСЕРВАТОРИИ ГАИШ МГУ

© 2023 Д. Ю. Цветков^{1*}, Н. Н. Павлюк¹, В. А. Ечеистов¹, П. В. Бакланов^{2,3,4}¹Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, Москва, 119234 Россия²Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, 117218 Россия³Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, 119333 Россия⁴Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН, Москва, 125047 Россия

Поступила в редакцию 14 апреля 2023 года; после доработки 17 мая 2023 года; принята к публикации 28 мая 2023 года

Представлены результаты фотометрических и спектроскопических наблюдений сверхновых на 2.5-м телескопе Кавказской горной обсерватории ГАИШ МГУ. Построены кривые блеска для объектов 2017egm, 2017eaw, 2018cow, 2018aoq, 2018zd, 2019uvr, 2019vxm, 2020tlf, 2020xtz, определены их основные параметры. Для SNe II-P 2017eaw, 2018aoq наблюдаемые кривые блеска сравниваются с теоретическими расчетами. Представлены спектры SNe 2019vxm, 2019uvr, 2020tlf, 2020xtz. Для SNe IIp 2019vxm, 2020tlf осуществлено исследование профилей эмиссионных линий. Для SNe 2019uvr, 2020xtz проведено моделирование спектров. Приведены результаты программы оперативной спектральной классификации SNe для восьми объектов.

Ключевые слова: *сверхновые*

1. ВВЕДЕНИЕ

Сверхновой (SN) называется процесс взрыва звезды на поздней стадии эволюции, сопровождаемый мощной оптической вспышкой, по светимости сопоставимой с целыми галактиками, с полным разрушением звезды или радикальным изменением ее структуры.

Исследования сверхновых (SNe) — одна из ключевых задач современной астрофизики. SNe являются основным источником обогащения межзвездной среды тяжелыми элементами, влияют на процессы звездообразования и эволюцию галактик. Теория взрывов SNe тесно связана с теорией последних стадий эволюции звезд. SNe некоторых типов ассоциируют с гамма-всплесками. Высокая светимость SNe позволяет наблюдать их на космологических расстояниях, они используются для построения внегалактической шкалы расстояний и исследования расширения Вселенной.

Основными наблюдаемыми характеристиками SNe в оптическом диапазоне являются спектр и его изменение со временем, а также кривые блеска — зависимость мощности излучения в разных спектральных диапазонах от времени.

Спектры легли в основу классификации SNe, которые разделяют на два главных типа: SNe без явных линий водорода относят к типу I, а с линиями водорода в спектре — к типу II.

В дальнейшем классификация SNe развивалась и усложнялась. С ростом числа открываемых и изученных сверхновых стало очевидным разнообразие этих объектов и их кривых блеска. Сейчас выделяют следующие типы и подтипы SNe:

- SN Ia — наиболее известный: термоядерный взрыв белого карлика в двойной системе, аккрецирующего вещество со спутника. Отличаются однородностью параметров, для них установлена зависимость светимости от формы кривых блеска, позволяющая использовать SNe Ia как стандартные свечи для определения расстояний. Имеются подтипы, отличающиеся характером спектра, кривых блеска и светимостью: SN Iax, SN Ia-91bg, SN Ia-91T. Эти SNe называют термоядерными (thermonuclear SNe) (Jha et al., 2019; Livio and Mazzali, 2018).
- Остальные типы SNe, как считается, обусловлены коллапсом ядра массивных (более $8 M_{\odot}$) звезд. Они называются коллапсирующими — CCSNe (Modjaz et al., 2019) — и также делятся на классы:

*E-mail: tsvetkov@sai.msu.su

- ◊ SN II: коллапс ядра массивной звезды с протяженной водородной оболочкой. Это самый распространенный тип SNe, для них надежно обнаружены звезды-предсверхновые, являющиеся в большинстве красными сверхгигантами (Smartt, 2009; 2015). По характеру кривых блеска делятся на SN II-P (с плато — участком постоянного блеска) и SN II-L (линейные — блеск падает с почти постоянной скоростью), однако, вероятно, существует непрерывная последовательность между подтипами. Подтип IIb — сразу после вспышки не отличается от SN II, однако затем линии водорода слабеют. SNe, у которых в спектрах имеются признаки взаимодействия оболочки с окружающей средой — узкие эмиссионные линии — обозначаются как SNe IIn (от слова *inflow* — узкий). Для SN II разработаны методы определения расстояния, не требующие калибровки с помощью промежуточных «ступеней» (Kirshner and Kwan, 1974; Hamuy and Pinto, 2002).
- ◊ SN Ib, Ic: коллапс ядра массивной звезды, у которой потеряна водородная или водородная и гелиевая оболочки. Если имеются признаки взаимодействия с околосредной оболочкой, то обозначаются Ibn, Icn. Принятое обозначение для этого класса — SESN (Stripped Envelope SN — SN со сброшенной оболочкой) (Prentice et al., 2019).
- ◊ В последнее время открыты SNe с повышенной светимостью, превышающей в максимуме -21^m , они обозначаются SLSN (Superluminous SN) и разделяются на имеющие в спектрах линии водорода (SLSN-II) и без водорода (SLSN-I) (Moriya et al., 2019; Nicholl, 2021).
- Весьма интересным новым классом являются быстрые голубые транзиенты FBOT (Fast Blue Optical Transient). Они отличаются от большинства SNe очень быстрым подъемом и спадом блеска, высокой светимостью, почти постоянным голубым цветом. Для объяснения предложены как модели с коллапсом ядра массивной звезды, так и имеющие отличную от SNe природу (Margutti et al., 2019; Gottlieb et al., 2022).

Широкое внедрение автоматизированных программ поиска SNe на малых и средних телескопах, применение широкоформатных ПЗС-приемников на крупных телескопах позволили в последнее время значительно увеличить количество открываемых SNe до 20 тысяч в год. Несмотря на значительный рост наблюдательных данных и теоретических работ, многие вопросы остаются нерешенными. Это природа предсверхновых типа Ia и их подтипов

и детали механизмов взрыва; для коллапсирующих сверхновых — особенности механизмов взрыва, процессы выхода ударной волны на поверхность и взаимодействия оболочки с окружающей средой. Для SLSNe и FBOT пока являются предметом дискуссий как природа предшественников, так и механизм взрыва.

В ГАИШ МГУ длительное время успешно проводятся наблюдательные и теоретические исследования SNe. С 1960 по 1997 гг. осуществлялась программа поиска вспышек SNe на 40-см астрографе Крымской станции ГАИШ, было открыто 22 SNe. Ю. П. Псковским были впервые в мире отождествлены спектры SN I типа, одним из первых установлена зависимость светимости от формы кривых блеска для SNe Ia, которая сейчас широко используется для космологических исследований (Pskovskii, 1969; 1977). Были получены оценки частоты вспышек SNe, исследовано их пространственное распределение в галактиках (Bartunov et al., 1994; Cappellaro et al., 1997; Pavlyuk and Tsvetkov, 2016). Проводилось теоретическое моделирование кривых блеска SNe (Tsvetkov et al., 2022).

Ввод в строй 2.5-м телескопа Кавказской горной обсерватории (КГО) ГАИШ МГУ значительно расширил возможности исследований SNe. На 2.5-м телескопе осуществлялись фотометрические и спектроскопические наблюдения SNe почти всех известных классов. Здесь будут рассмотрены результаты наблюдений SN Ia 2020xtz; SN Ib 2019yvr; SN II-P 2017eaw, 2018aoq, 2018zd; SN IIn 2019vxn, 2020tlf; SLSN 2017egm; FBOT 2018cow, приведены некоторые результаты программы оперативной классификации SNe.

2. ФОТОМЕТРИЯ

Фотометрические наблюдения SNe на камере NBI (Shatsky et al., 2020) были начаты в январе 2018 г. Для стандартной редукции изображений и фотометрии мы использовали IRAF¹⁾. Величины SNe были получены путем PSF-фотометрии относительно избранных локальных звезд-стандартов. Результаты были преобразованы в стандартные величины $UBVR_CI_C$ с помощью инструментальных цветовых коэффициентов.

Наибольшие объемы данных получены для объектов 2017eaw, 2017egm, 2018aoq, 2018zd, 2018cow.

¹⁾ IRAF распространяется Национальной обсерваторией оптической астрономии, управляемой Ассоциацией университетов по исследованиям в области астрономии в рамках соглашения о сотрудничестве с Национальным научным фондом США.

2.1. SLSN-I 2017egm

SN 2017egm — одна из самых близких и ярких SLSNe. Одной из ее особенностей была вспышка в нормальной спиральной галактике NGC 3191, в то время как большинство SLSNe находятся в галактиках пониженной светимости с малой металличностью. Фотометрические наблюдения SN 2017egm в фильтрах *UBVRI* проводились на 2.5-м телескопе КГО и на шести других телескопах, продолжительность мониторинга составила 285 суток. Изображение галактики NGC 3191 со сверхновой показано на рис. 1, кривые блеска — на рис. 2. Для приведения инструментальных величин к стандартной системе при наблюдениях этой и последующих SNe использовались инструментальные цветовые уравнения, постороенные для каждого прибора по наблюдениям фотометрических стандартов. Вместе с нашими данными нанесены результаты фотометрии Bose et al. (2018), Hosseinzadeh et al. (2021) и Zhu et al. (2023).

Кривые блеска показывают, что SN 2017egm принадлежит к классу SLSN-I с медленным падением блеска. Особенность SN 2017egm — линейный рост блеска перед максимумом со скоростью $0^{\text{m}}068$ в сутки. Дата максимума блеска в фильтре *V* JD 2457926.5, в остальных фильтрах даты отличаются на 1–2 суток. Кривые блеска после максимума можно разделить на пять этапов:

- медленное, постепенно ускоряющееся падение блеска в интервале фаз 0–114 суток;
- ступенька продолжительностью около 10 суток;
- быстрое падение блеска примерно на 2^{m} в интервале 124–150 суток;
- участок постоянного блеска 150–234 суток;
- быстрое падение блеска до конца охваченного наблюдениями участка.

Такая сложная фотометрическая эволюция характерна для SLSN, возможными причинами могут быть взаимодействие оболочки с различными слоями окружающего звезду вещества или изменение темпа подкачки энергии от центрального источника, однако у теорий имеются трудности.

На рис. 3 показано сравнение кривой блеска SN 2017egm в абсолютных *R*-величинах с SLSNe-I 2007bi, PTF10nmm, PTF11rks, PTF12dam и 2015bn (Gal-Yam et al., 2009; Young et al., 2010; Ingera et al., 2013; Nicholl et al., 2013, 2016; De Cia et al., 2018) По максимальной светимости SN 2017egm не выделяется среди других SLSNe-I, характер фотометрической эволюции также довольно похож на наблюдаемый у других объектов этого типа, уникальной особенностью является линейный рост блеска перед максимумом.

2.2. FBOT 2018cow

Оптический транзиент AT 2018cow находился на расстоянии 66.3 Мпк и достиг максимального блеска около $13^{\text{m}}5$, поэтому он всесторонне исследовался несколькими группами: Prentice et al. (2018), Margutti et al. (2019), Perley et al. (2019), Leung et al. (2020), Pellegrino et al. (2021), Xiang et al. (2021).

Наши фотометрические наблюдения в фильтрах *UBVRI* охватили интервал в 69 суток, использовались те же телескопы, что и для SN 2017egm. Кривые блеска представлены на рис. 4, вместе с нашими данными показаны результаты Margutti et al. (2019), Perley et al. (2019) и Xiang et al. (2021).

Основные особенности кривых блеска AT 2018cow — очень быстрый (за 2–3 дня) подъем блеска к максимуму, который наступил JD 2458287.4 одновременно во всех фильтрах, и очень быстрое падение блеска после максимума со скоростью $0^{\text{m}}34$ в сутки. Абсолютная величина в максимуме достигла $M_V = -20^{\text{m}}8$. Через 10 суток после максимума началось снижение скорости падения блеска, и после фазы 20 суток начался практически линейный участок со скоростью падения блеска $0^{\text{m}}08$ в сутки. При этом показатели цвета оставались почти постоянными, $(B - V) \approx (V - R) \sim 0^{\text{m}}$; $(U - B) \sim -1^{\text{m}}$. На кривых блеска имеются два горба при фазах 10 и 15 суток, лучше заметные в фильтре *U*.

Для объяснения явления FBOT 2018cow было предложено несколько моделей, включая приливное разрушение звезды около черной дыры промежуточной массы, магнитар, взаимодействие сверхновой, взрыв которой обусловлен пульсационной парной нестабильностью, с окружающим веществом, однако проблема пока не решена (Quin et al., 2019; Perley et al., 2019; Leung et al., 2020).

2.3. SN II-P 2017eaw

SN 2017eaw — одна из наиболее близких и ярких SNe II-P последнего десятилетия, она привлекла повышенное внимание исследователей (Rho et al., 2018; Buta and Keel, 2019; Rui et al., 2019; Szalai et al., 2019; Tinyanont et al., 2019; Van Dyk et al., 2019; Weil et al., 2020). На архивных изображениях места вспышки была обнаружена предсверхновая. Согласно Van Dyk et al. (2019) это был красный сверхгигант со светимостью $L \sim 1.2 \times 10^5 L_{\odot}$, радиусом $R \sim 10^3 R_{\odot}$, вероятной начальной массой $M_0 \sim 15 M_{\odot}$.

Наши фотометрические наблюдения в фильтрах *UBVRI* были начаты сразу после открытия и продолжались 568 дней, что позволило построить подробные кривые блеска и цвета на всех этапах эволюции SN. Кривые блеска показаны на рис. 5.



Рис. 1. Цветное изображение SN 2017egt, скомбинированное из кадров в фильтрах BVR , полученных на 2.5-м телескопе КГО 3 июля 2017 г. Север вверху, восток слева, поле зрения $3'.5$.

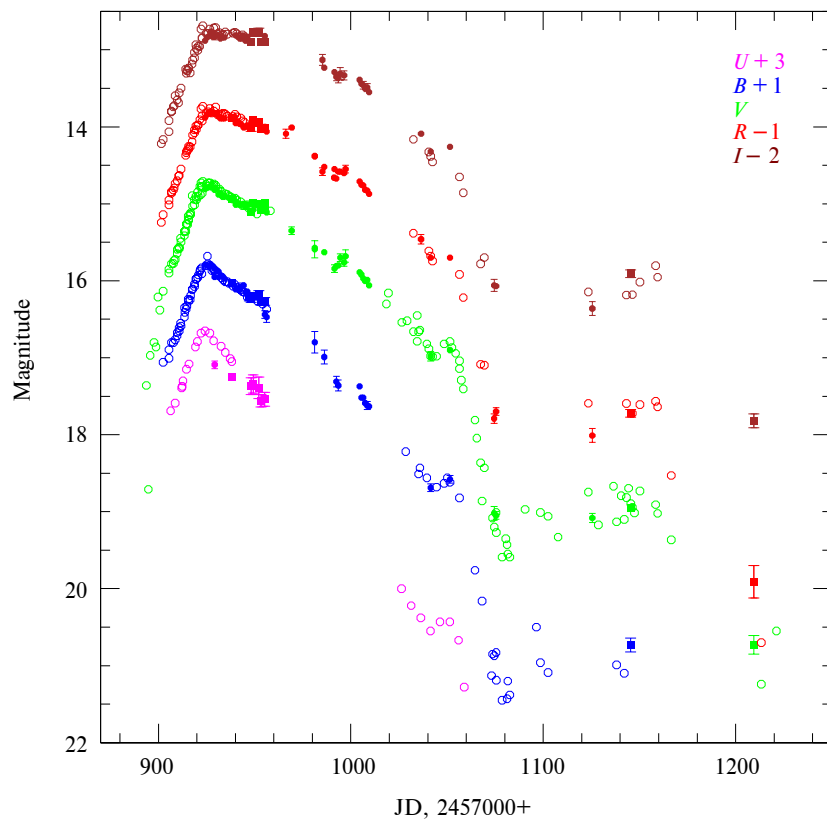


Рис. 2. Кривые блеска SN 2017egt в фильтрах $UBVRI$. Наблюдения в разных полосах обозначены разными цветами и сдвинуты по оси ординат для ясности, цветовые обозначения и величины сдвигов указаны на рисунке. Наблюдения на 2.5-м телескопе КГО обозначены квадратами, наши наблюдения на других телескопах — точками, данные из литературы — кружками. Ошибки приведены только для наших величин, если они превышают размер символов.

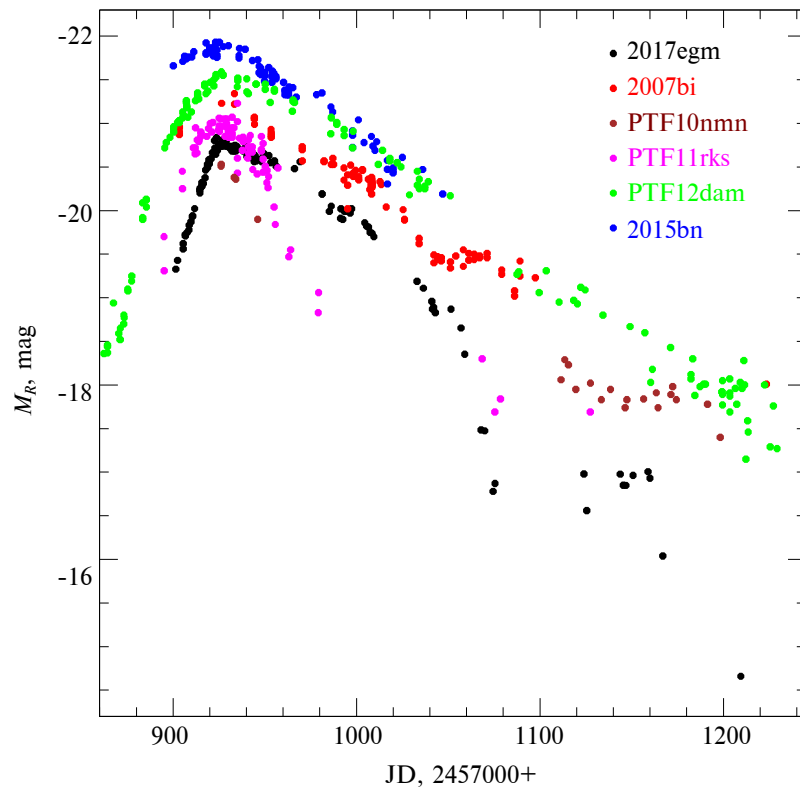


Рис. 3. Кривая блеска SN 2017egm в абсолютных R -величинах и сравнение с кривыми блеска пяти SLSNe-I, данные для них взяты из процитированной в тексте литературы.

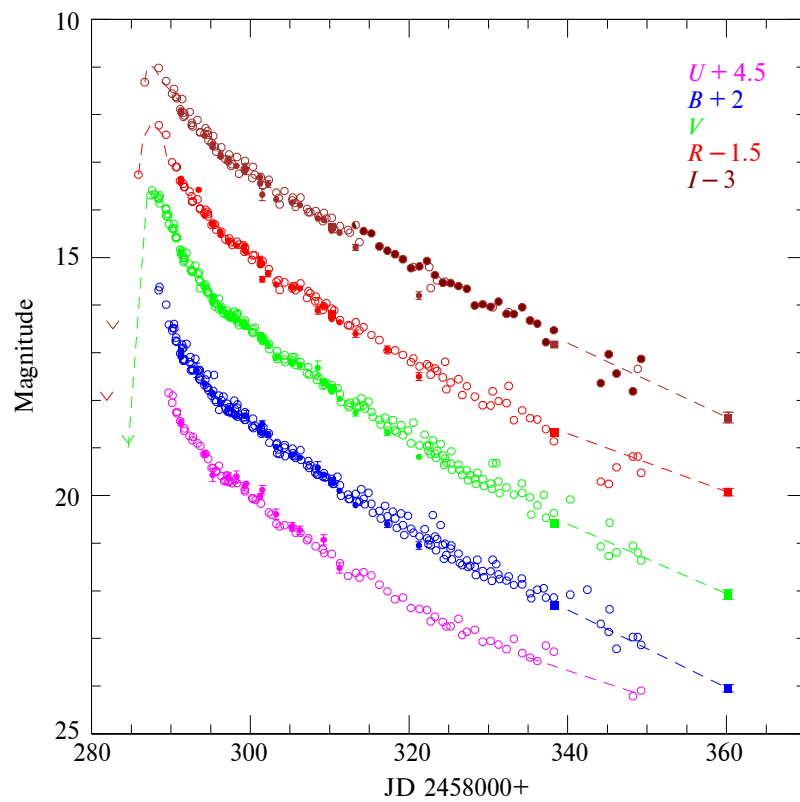


Рис. 4. Кривые блеска SN 2018cow в полосах $UBVRI$. Обозначения такие же, как на рис. 2.

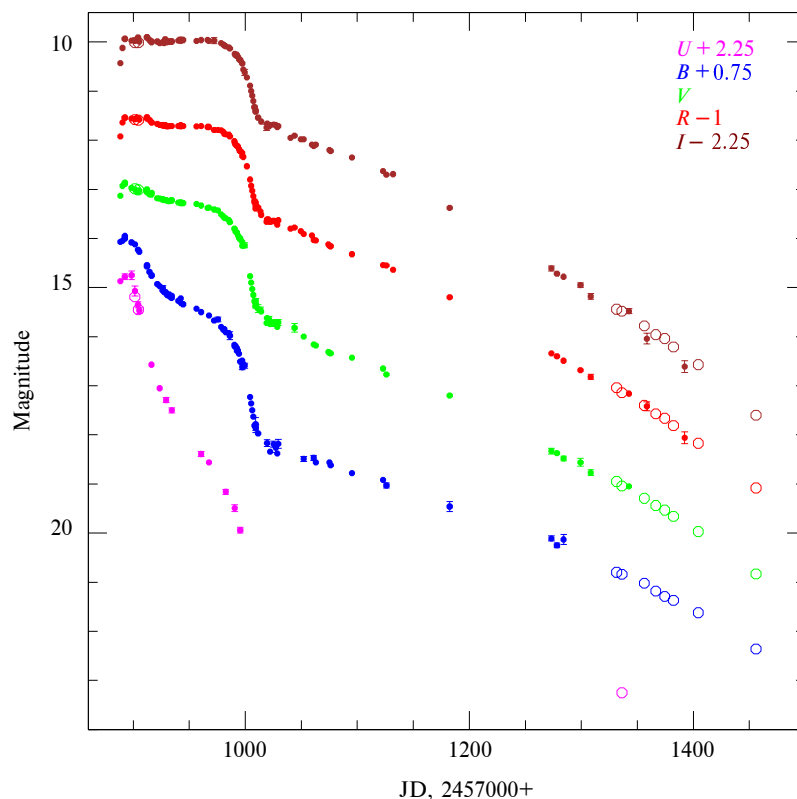


Рис. 5. Кривые блеска SN 2017eaw в полосах *UBVR-I*. Наблюдения на 2.5-м телескопе показаны кружками, на других телескопах ГАИШ — точками.

Основные параметры кривых блеска: дата максимума JD 2457892.5, максимальный блеск: $U = 12^m5$, $B = 13^m22$, $V = 12^m87$, $R = 12^m54$, $I = 12^m18$; начало быстрого падения блеска после плато JD 2457980, начало линейного участка кривой блеска JD 2458810 при блеске $B = 17^m3$, $V = 15^m5$, $R = 14^m5$, $I = 13^m8$. Скорость падения блеска на первой стадии линейного участка составила в фильтрах B, V, R, I соответственно 0^m0054 , 0^m0106 , 0^m0092 , 0^m0090 в сутки. В период JD 2458150–250 происходило плавное увеличение скорости падения блеска, которая в интервале JD 2458250–600 составила для тех же фильтров соответственно 0^m012 , 0^m014 , 0^m015 , 0^m017 в сутки.

В последнее время для NGC 6946 были получены новые оценки расстояния, согласно данным, приведенным Van Dyk et al. (2019), наиболее вероятное значение — около 7.7 Мпк. Тогда абсолютные величины в максимуме составят: $M_U = -18^m4$, $M_B = -17^m45$, $M_V = -17^m5$, $M_R = -17^m63$, $M_I = -17^m77$. Светимость SN 2017eaw превышает среднюю для SNe II-P $M_B = -16.75$, но все же она примерно на 1^m слабее наиболее ярких SNe II-P (Richardson et al., 2014).

Форма кривых блеска показывает, что SN 2017eaw является нормальной II-P SN и предсверхновая была красным сверхгигантом (RSG), что подтверждается отождествлением предсверхновой (Van Dyk et al., 2019). SNe II-P демонстрируют большое разнообразие светимости и формы кривых блеска. Основные детали кривых блеска определяются начальным радиусом R , полной массой предсверхновой M , массой ^{56}Ni и энергией взрыва E (Kasen and Woosley, 2009; Litvinova and Nadezhin, 1985).

Мы рассчитали сетку моделей в пространстве параметров ($R, M, M(^{56}\text{Ni}), E$) для поиска наилучшей модели. Для вычислений использовался многогрупповой радиационно-гидродинамический код STELLA (Blinnikov et al., 2006).

Модели предсверхновых были построены в предположении неэволюционного гидростатического равновесия, как описано в работе Baklanov et al. (2005). Прохождение ударной волны вызывает сильное перемешивание в оболочке из-за неустойчивости Релея–Тейлора.

Взрыв SN симулировался выделением энергии взрыва в форме «тепловой бомбы» во внутренней части выброса.

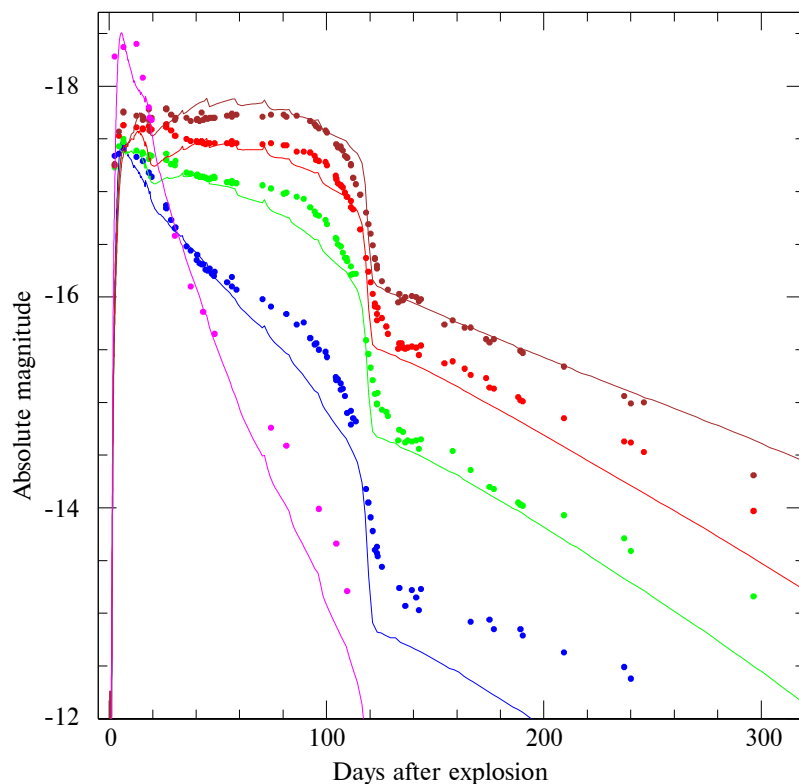


Рис. 6. Наблюдаемые кривые блеска SN 2017eaw в абсолютных величинах $UBVRI$ (точки) и результаты моделирования программой STELLA (линии). Цветовые обозначены фильтров такие же, как на предыдущих рисунках.

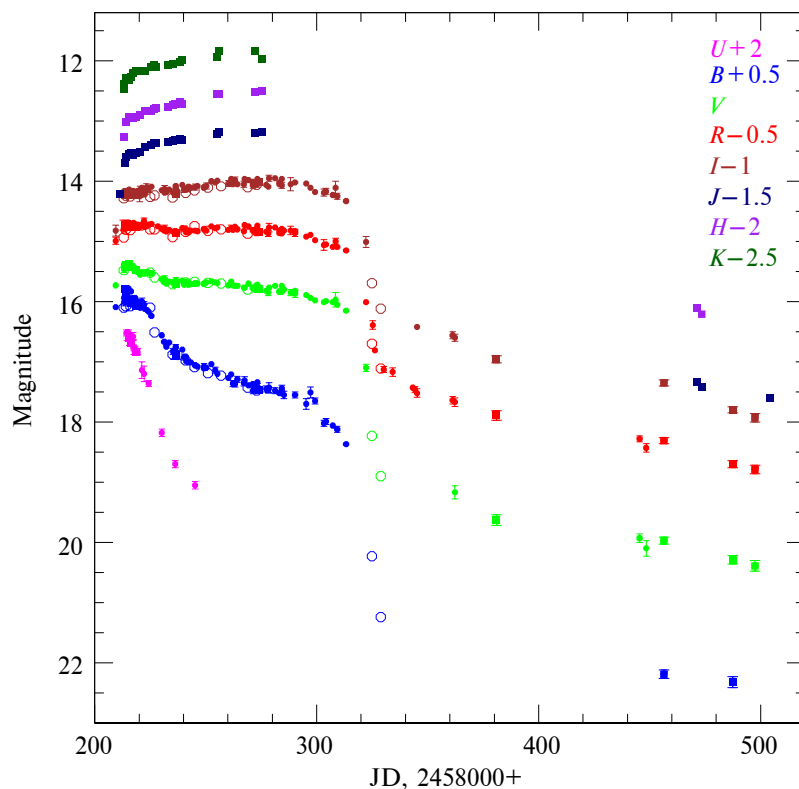


Рис. 7. Кривые блеска SN 2018aog в полосах $UBVRIJK$. Квадраты — наблюдения на 2.5-м телескопе, точки — наблюдения на других телескопах ГАИШ, кружки — данные из литературы.

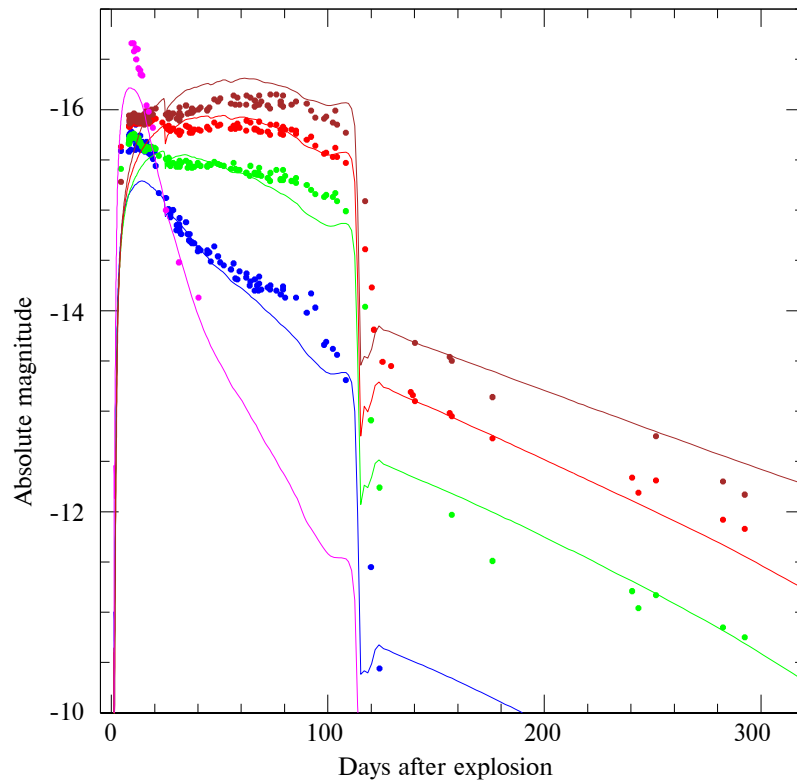


Рис. 8. Наблюдаемые кривые блеска SN 2018aoq в полосах *UBVR* (точки) и результаты моделирования программой STELLA (линии). Цветовые обозначены фильтров такие же, как на предыдущих рисунках.

При выборе моделей учитывалась также зависимость скорости фотосферы от времени согласно Van Dyk et al. (2019). Результаты показаны на рис. 6, параметры модели $R = 600 R_{\odot}$, $M = 23 M_{\odot}$, $E = 2 \times 10^{51}$ эрг, $M(^{56}\text{Ni}) = 0.05 M_{\odot}$.

2.4. SN II-P 2018aoq

Исследование SN II-P 2018aoq представляет особый интерес, так как она вспыхнула в хорошо известной сейфертовской галактике NGC 4151. Для этой галактики имеются оценки расстояния, полученные как на основании изучения активного ядра (19 Мпк, Hönig et al. (2014)), так и по цефеидам (15.8 Мпк, Yuan et al. (2020)). Для SN 2018aoq была зарегистрирована звезда-предсверхновая, оказавшаяся красным сверхгигантом (O'Neill et al., 2019).

Фотометрические наблюдения в *UBVR*-фильтрах осуществлялись нами в шести обсерваториях на протяжении 287 суток, спектроскопические наблюдения проводились в Шемахинской обсерватории в Азербайджане (Tsvetkov et al., 2019).

На 2.5-м телескопе КГО была выполнена как оптическая, так и инфракрасная фотометрия.

JHK-фотометрия SN 2018aoq была сделана по кадрам, полученным в рамках осуществления программы наблюдений сейфертовской галактики NGC 4151 с помощью камеры ASTRONIRCAM.

Кривые блеска SN 2018aoq в фильтрах *UBVR**IJK* показаны на рис. 7. Вместе с нашими данными нанесены результаты O'Neill et al. (2019), их величины *gri* переведены в *RI* с помощью соотношений из работы Chonis and Gaskell (2008).

Кривые блеска типичны для SN II-P, плато продолжается около 100 суток. Наши первые наблюдения и верхние пределы, сообщенные Yamanaka et al. (2018) и O'Neill et al. (2019), позволяют надежно установить точки максимума блеска в полосах *B* и *V*: $t_{\text{max}} = \text{JD}2458215 \pm 2$, $B_{\text{max}} = 15^{\text{m}}35 \pm 0^{\text{m}}1$, $V_{\text{max}} = 15^{\text{m}}37 \pm 0^{\text{m}}05$. В фильтре *R* блеск после выхода на плато оставался практически постоянным $R_{\text{pl}} = 15^{\text{m}}22 \pm 0^{\text{m}}1$, в полосе *I* блеск на плато слабо возрастал, достигнув максимума $I_{\text{max}} = 15^{\text{m}}0 \pm 0^{\text{m}}1$ около JD 2458270. Быстрое падение блеска после плато началось около JD 2458310, линейный участок кривой блеска начался в JD 2458340, при блеске $B = 21^{\text{m}}0$, $V = 19^{\text{m}}0$, $R = 18^{\text{m}}0$, $I = 17^{\text{m}}4$. Скорость падения блеска на линейном участке можно надежно установить только для фильтров *R* и *I*. Она

составляет соответственно 0^m0087 и 0^m0078 в сутки.

В инфракрасных полосах *JHK*-блеск растет до фазы, соответствующей середине плато, и достигает максимальных значений $J_{\max} = 14^m7$; $H_{\max} = 14^m5$; $K_{\max} = 14^m35$. К сожалению, отсутствуют наблюдения на второй половине плато и переходе от плато к линейному падению блеска.

Приняв для SN2018aoq расстояние 16 Мпк и избыток цвета $E(B - V) = 0^m04$, найдем максимальную абсолютную величину $M_B = -15^m83$, $M_V = -15^m77$, $M_R = -15^m9$, $M_I = -16^m1$.

По этому параметру SN2018aoq занимает промежуточное положение между SNe II-P с нормальной светимостью (типичный объект SN2017eaw, Tsvetkov et al. (2018)) и SNe II-P с пониженной светимостью (SN2005cs, Tsvetkov et al. (2006)), а наибольшее сходство демонстрирует с SN2008ip (Roy et al., 2011).

Оценки расстояния до NGC4151 были получены нами применением для SN2018aoq методов ЕРМ (expanding photosphere method) (Kirshner and Kwan, 1974) и SСМ (standard candle method) (Hamuy and Pinto, 2002): $D_{\text{ЕРМ}} = 20.0 \pm 1.3$ и $D_{\text{SСМ}} = 16.4 \pm 1.5$ Мпк. Расчеты для метода ЕРМ производились с использованием зависимости параметра дилуции ζ от температуры согласно Dessart and Hillier (2005). Расстояние $D_{\text{ЕРМ}}$ хорошо согласуется с оценкой Hönig et al. (2014) $D = 19.0 \pm 2.5$ Мпк, основанной на сопоставлении размера излучающего в ИК-диапазоне пылевого тора по данным фотометрии и инфракрасной интерферометрии.

O'Neill et al. (2019) получили значение расстояния $D_{\text{SСМ}} = 18.2 \pm 1.2$ Мпк, что также хорошо согласуется с оценкой Hönig et al. (2014). Однако в работе Yuan et al. (2020) на основании исследования цефеид в NGC4151 получена оценка $D = 15.8 \pm 0.4$ Мпк, существенно меньшая приведенных выше оценок. Известно, что применение зависимости ζ от T , установленной Eastman et al. (1996), дает меньшие значения расстояния, чем применение зависимости Dessart and Hillier (2005). Мы провели расчет методом ЕРМ с зависимостью Eastman et al. (1996) и получили $D_{\text{ЕРМ}} = 15.9 \pm 1.8$ Мпк, совпадающую с оценкой по цефеидам. Вполне возможно, что для разных SN реализуются различные зависимости ζ от T , и для SN2018aoq именно зависимость Eastman et al. (1996) является подходящей. Отметим также, что наша оценка $D_{\text{SСМ}}$ также хорошо согласуется с результатами Yuan et al. (2020).

Форма кривых блеска показывает, что SN2018aoq является нормальной II-P SN и предсверхновой

была красным сверхгигантом (RSG), что подтверждается отождествлением предсверхновой (O'Neill et al., 2019).

Как и для сверхновой SN2017eaw, мы рассчитали сетку моделей в пространстве параметров $(R, M, M(^{56}\text{Ni}), E)$ для поиска наилучшей модели с помощью кода STELLA. Также варьировалась металличность Z .

Параметры модели $R = 500 R_{\odot}$, $M = 15 M_{\odot}$, $M(^{56}\text{Ni}) = 0.01 M_{\odot}$, $E = 0.4 \times 10^{51}$ эрг, $Z = 0.1 Z_{\odot}$. Моделировались кривые блеска в полосах *UBVRI*, результаты показаны на рис. 8.

2.5. SN II 2018zd

Фотометрические наблюдения SN2018zd проводились на 2.5-м телескопе КГО, а также на восьми других телескопах. Наблюдения продолжались 336 дней, получено 246 оценок блеска в фильтрах *UBVRI* (Tsvetkov et al., 2022). Кривые блеска SN2018zd показаны на рис. 9, также приведены данные Callis et al. (2021); Hiramatsu et al. (2021); Zhang et al. (2020).

Можно достаточно надежно определить точки максимума блеска в разных фильтрах: $U_{\max} = 12^m96$; $B_{\max} = 13^m73$; $V_{\max} = 13^m53$; $R_{\max} = 13^m43$; $I_{\max} = 13^m34$, точность оценок около 0^m05 . Даты максимумов различаются несущественно: в полосах *U, B* $t_{\max} = \text{JD } 2458187.6$; в полосах *V, R* $t_{\max} = \text{JD } 2458188.2$; в *I*-фильтре $t_{\max} = \text{JD } 2458189.4$; точность этих данных около 1.0–1.5 суток. Скорость падения блеска после максимума в фильтрах *UBVRI* составила соответственно 0^m051 , 0^m029 , 0^m015 , 0^m011 , 0^m007 в сутки. Эта скорость резко возросла в фазе 112 суток после максимума, а через 13 суток после этого скорость падения блеска замедлилась, начался линейный участок кривых блеска. На этом линейном «хвосте» скорость падения блеска составила в фильтрах *BVRI* соответственно 0^m0074 , 0^m0098 , 0^m0103 , 0^m0112 в сутки.

Кривая блеска SN2018zd в абсолютных *V*-величинах и сравнение с кривыми для SNe II 1980K, 1999em, 2013by, 2013ej, 2017eaw (Buta, 1982; Elmhamdi et al., 2003; Tsvetkov et al., 2018; Buta and Keel, 2019; Van Dyk et al., 2019) показаны на рис. 10, расстояние до SN2018zd принято равным 15.6 Мпк (Callis et al., 2021). Максимальная абсолютная величина SN2018zd составляет $M_V = -18^m0$, она ярче большинства SNe II-P, однако уступает SNe II-L с наибольшей светимостью.

По форме кривых блеска SN2018zd похожа на SNe 2013by, 2013ej, однако промежуток от максимума до начала резкого падения блеска у нее гораздо больше, около 110 суток, в то время как для

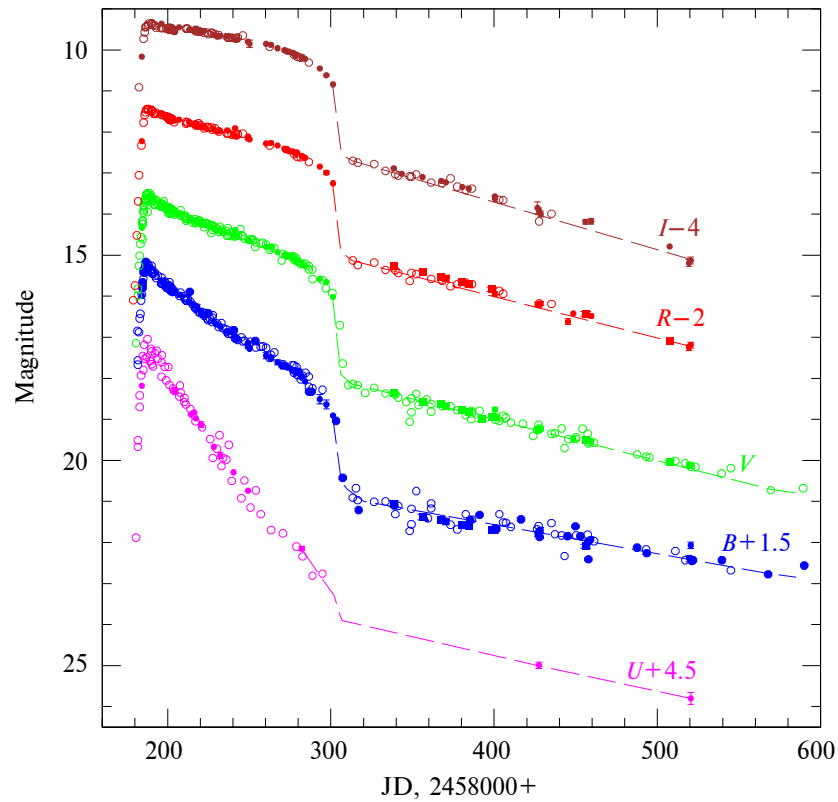


Рис. 9. Кривые блеска SN 2018zd в полосах $UBVRI$. Квадраты — наблюдения на 2.5-м телескопе, точки — наблюдения на других телескопах ГАИШ (Tsvetkov et al., 2022), кружки — данные из литературы.

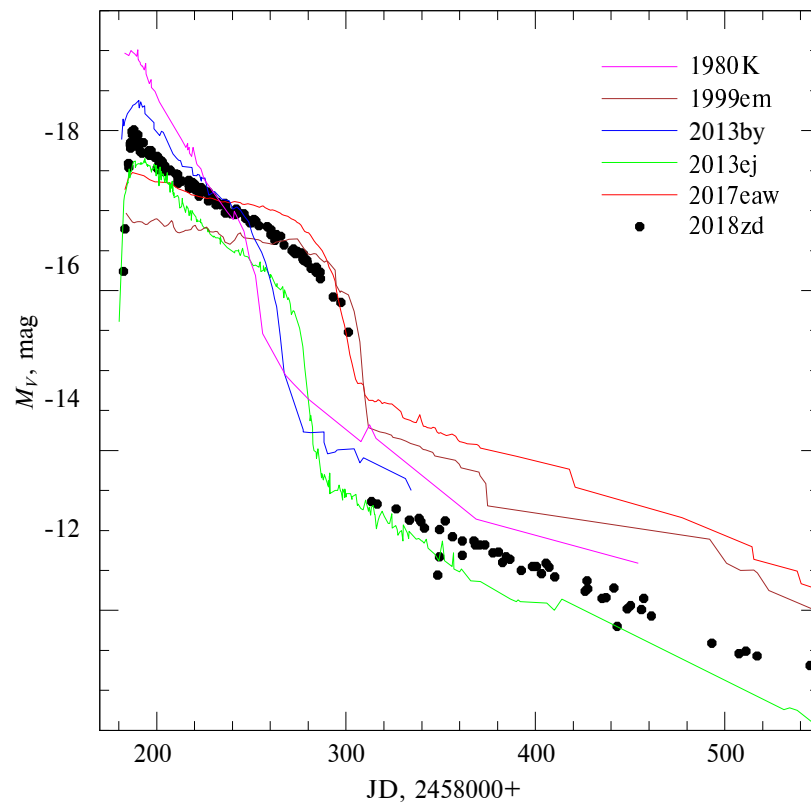


Рис. 10. Кривая блеска SN 2018zd в абсолютных V -величинах и сравнение с кривыми блеска пяти SNe II.

SN 2013bu и 2013ej он составляет соответственно 80 и 70 суток. На стадии линейного «хвоста» кривых блеска SNe, относящиеся к линейным и промежуточным подтипам, имеют меньшую светимость, чем классические SNe II-P. Вероятной причиной является меньшая масса синтезированного при взрыве ^{56}Ni .

Полученные нами данные показывают, что по фотометрическим характеристикам SN 2018zd является объектом, промежуточным между классами SN II-P и II-L. Особенности SN 2018zd являются достаточно высокая светимость в максимуме $M_V = -18^m0$, низкая скорость расширения оболочки, большой промежуток времени от максимума до быстрого падения блеска перед выходом на финальный линейный участок кривых блеска, медленный рост показателей цвета ($U - B$) и ($B - V$) после максимума.

3. КЛАССИФИКАЦИЯ SN

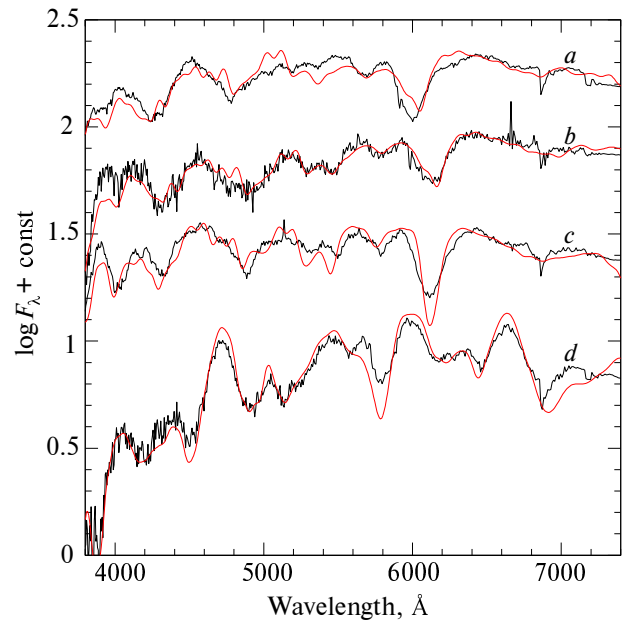
После введения в строй оптического двухлучевого спектрографа низкого и среднего разрешения TDS (Potanin et al., 2020) были начаты систематические спектроскопические наблюдения SNe. По инициативе группы ALerCHE (Förster et al., 2021) проводились наблюдения для оперативной классификации наиболее интересных SNe, открытых при обзоре неба ZTF (Bellm et al., 2019), результаты публиковались на сайте TNS²⁾. Классификация SNe осуществлялась с помощью кода SNID (Blondin and Tonry, 2007). Для данного спектра SN программа производит поиск наилучшим образом совпадающего спектра из базы данных, в результате определяется тип исследуемой SN, примерная фаза ее эволюции и красное смещение (если оно не известно по данным о родительской галактике). Были опубликованы следующие сообщения о классификации: Atapin et al. (2020a, b, c, d, e, 2021a, b, c, 2020f, 2021d), Burlak et al. (2020a, b), Dodin et al. (2020), Lander et al. (2021), Zheltoukhov et al. (2020) и Voziakova et al. (2021).

Процедура иллюстрируется на рис. 11–13.

4. СПЕКТРАЛЬНЫЙ МОНИТОРИНГ SN

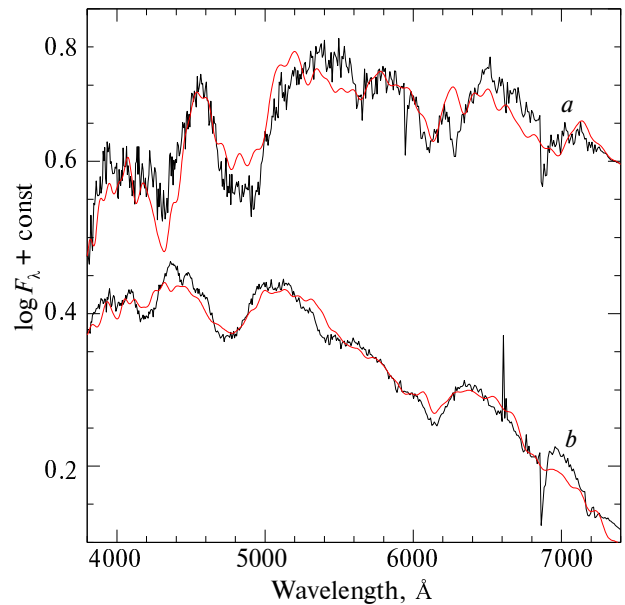
Большую ценность представляют продолжительные спектральные наблюдения SNe, позволяющие проследить эволюцию расширяющейся оболочки от фотосферной до небулярной стадии. Анализ изменяя линий, их профилей и интенсивностей дает важную информацию о химическом составе, физических условиях и структуре оболочки, а иногда и окружающего околозвездного вещества.

²⁾<https://www.wis-tns.org/>



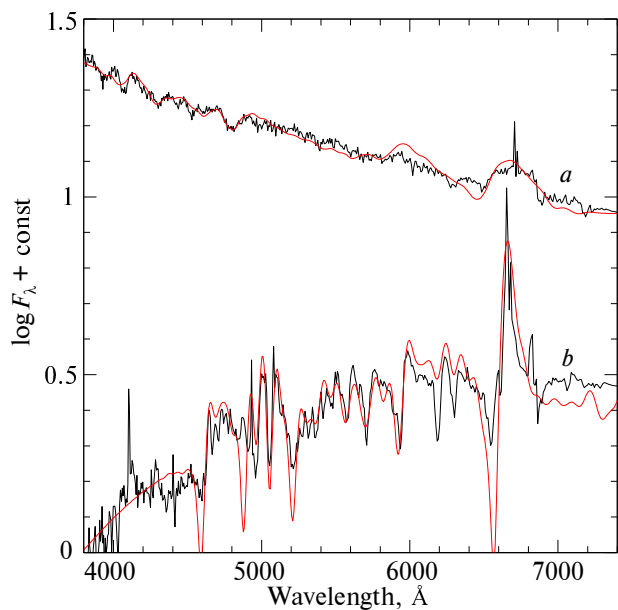
a: 2021rhu, 2021/07/01, 0.0035, -5;
 b: 2020adcb, 2020/12/22, 0.015, -5;
 c: 2020acch, 2020/12/10, 0.017, -1;
 d: 2020abim, 2020/12/03, 0.016, 60.

Рис. 11. Классификационные спектры четырех SNe Ia, полученные на 2.5-м телескопе КГО (черный цвет) и наиболее близкие к ним спектры из базы данных программы SNID (красный цвет), SNe обозначены a–d, для каждой указано название, дата получения спектра на 2.5-м телескопе, красное смещение, фаза в сутках относительно максимума (определенная программой SNID).



a: 2021do, 2021/01/04, 0.0093, -3;
 b: 2020adow, 2020/12/27, 0.0074, -5.

Рис. 12. Классификационные спектры двух SNe Ic, обозначения аналогичны рис. 11.



a: 2020adj, 2020/12/25, 0.022, -5 ;
b: 2020acac, 2020/12/10, 0.015, 17.

Рис. 13. Классификационные спектры двух SNe II, обозначения аналогичны рис. 11.

Особенно полезным является сочетание спектроскопических и фотометрических данных.

В 2019 г. было получено только несколько спектров для наиболее интересных объектов, а в течение 2020–2022 годов был осуществлен продолжительный мониторинг нескольких достаточно ярких в максимуме SNe, фотометрические данные для них получались на 60-см телескопе RC600 КГО и других телескопах ГАИШ.

Рассмотрим здесь результаты наблюдений SNe II 2019vxt, 2020tlf, SN Ib 2019yvr, SN Ia 2020xtz.

4.1. SNe II 2019vxt, 2020tlf

При вспышках SNe II плотное околосредное вещество эффективно перерабатывает кинетическую энергию выброса в излучение, поэтому такие объекты отличаются высокой светимостью и продолжительным периодом яркого свечения. Наблюдения таких SNe дают важную информацию о структуре массивных предсверхновых и их окружения.

В конце 2019 г. и в 2020 г. были проведены спектроскопические и фотометрические наблюдения двух ярких SNe II — 2019vxt и 2020tlf. Для SN 2019vxt было получено два спектра в фазах 33 и 59 суток после максимума, для SN 2020tlf — один, в фазе 1 день до максимума.

Полученные спектры показаны на рис. 14. Они демонстрируют типичную картину для SNe II:

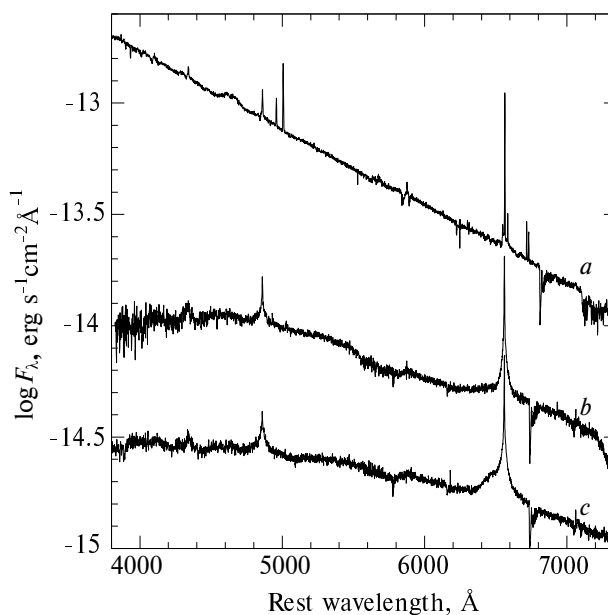


Рис. 14. Спектры SNe 2019vxt и 2020tlf. Спектры исправлены за красное смещение и поглощение света, абсолютные значения потоков определены сравнением с данными фотометрии. *a*: спектр SN 2020tlf в фазе -1 день, сдвинут по оси ординат на $+1$; *b*: спектр SN 2019vxt в фазе 33 дня; *c*: спектр SN 2019vxt в фазе 59 суток, сдвинут на -0.25 .

доминируют эмиссионные линии водорода с узкими пиками и широкими крыльями. В спектре SN 2020tlf также заметна эмиссионная деталь около $\lambda 4700$, которая обычно идентифицируется как бленда линий N III и He II и возникает благодаря ионизации околосредного вещества излучением при выходе ударной волны на поверхность звезды.

В спектре SN 2020tlf заметны эмиссионные линии от родительской галактики: [O III] $\lambda 4959$, $\lambda 5007$, [N II] $\lambda 6548$, $\lambda 6584$, [S II] $\lambda 6717$, $\lambda 6731$.

Профили линий водорода после вычитания континуума представлены на рис. 15 и 16. На рис. 17 показан профиль эмиссий N III и He II в спектре SN 2020tlf.

Линии могут быть представлены суммой гауссиан или гауссовского и лоренцевского профиля. Для SN 2019vxt характерные ширины линий водорода *FWHM* составили около 200 км с^{-1} для узких компонент и примерно $2000\text{--}3000 \text{ км с}^{-1}$ для широких крыльев. Линия H α в фазе 59 суток показывает голубой избыток, который можно представить гауссианой с *FWHM* $\sim 7400 \text{ км с}^{-1}$, сдвинутой примерно на 1250 км с^{-1} в голубую сторону.

В спектре SN 2020tlf характерные ширины линий водорода составляют $200\text{--}300 \text{ км с}^{-1}$ для узких компонент и примерно 2000 км с^{-1} для

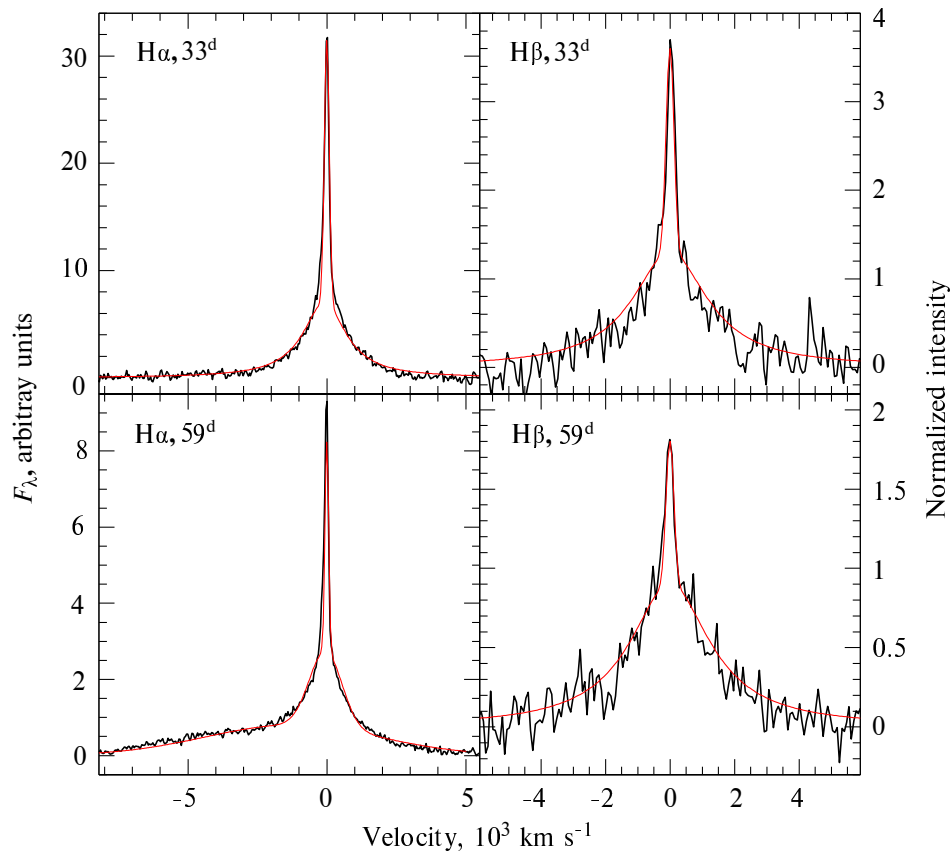


Рис. 15. Профили линий водорода в спектрах SN 2019vxp (черные линии) и их представление суммой гауссовского и лоренцевского профилей (красные линии)

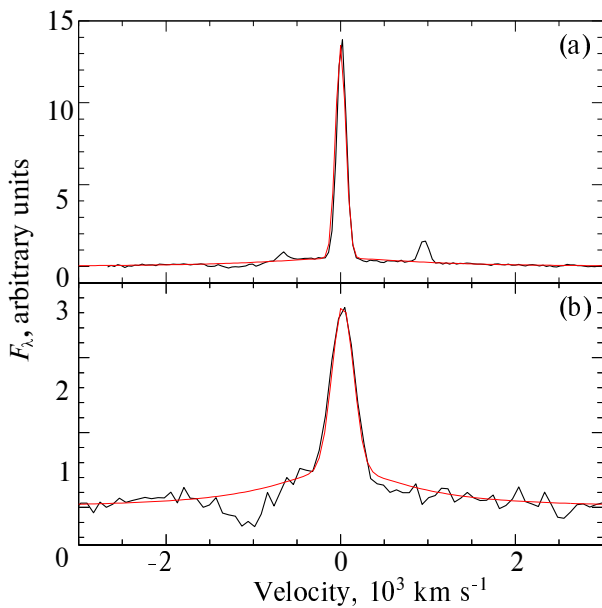


Рис. 16. Профили линий H α (a) и H β (b) в спектре SN 2020tlf и их представление суммой гауссовского и лоренцевского профилей (красные линии).

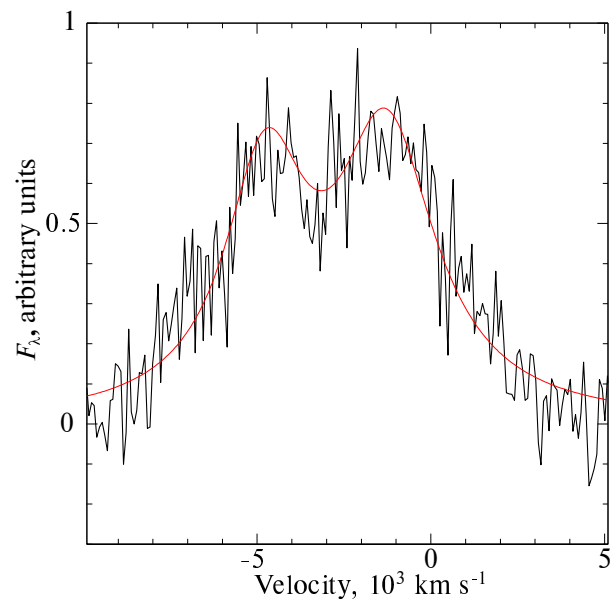


Рис. 17. Эмиссия N III + He II в спектре SN 2020tlf и фитирование лоренцевскими профилями (красные линии). Начало отсчета скорости соответствует длине волны линии He II.

широких. Линии H α и H β имеют абсорбционные компоненты, соответствующие скорости рас-

ширения около 1150 км с⁻¹. Эмиссионная деталь, отождествляемая с линиями N III и He II, может

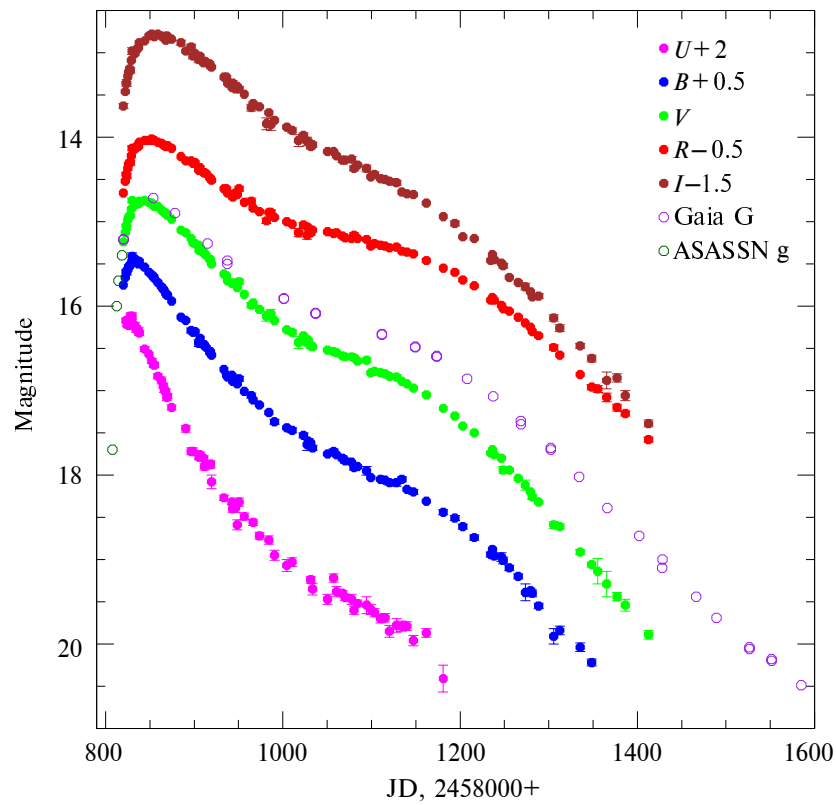


Рис. 18. Кривые блеска SN 2019vxt в фильтрах *UBVRI*.

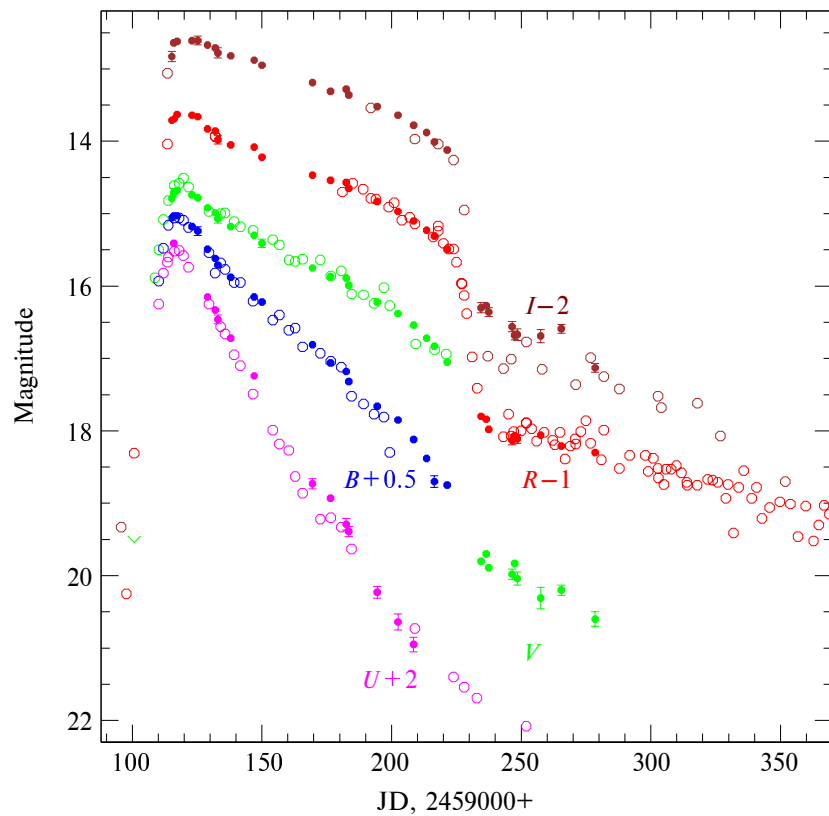


Рис. 19. Кривые блеска SN 2020tlf в фильтрах *UBVRI*. Точки — наши результаты, кружки — данные из литературы.

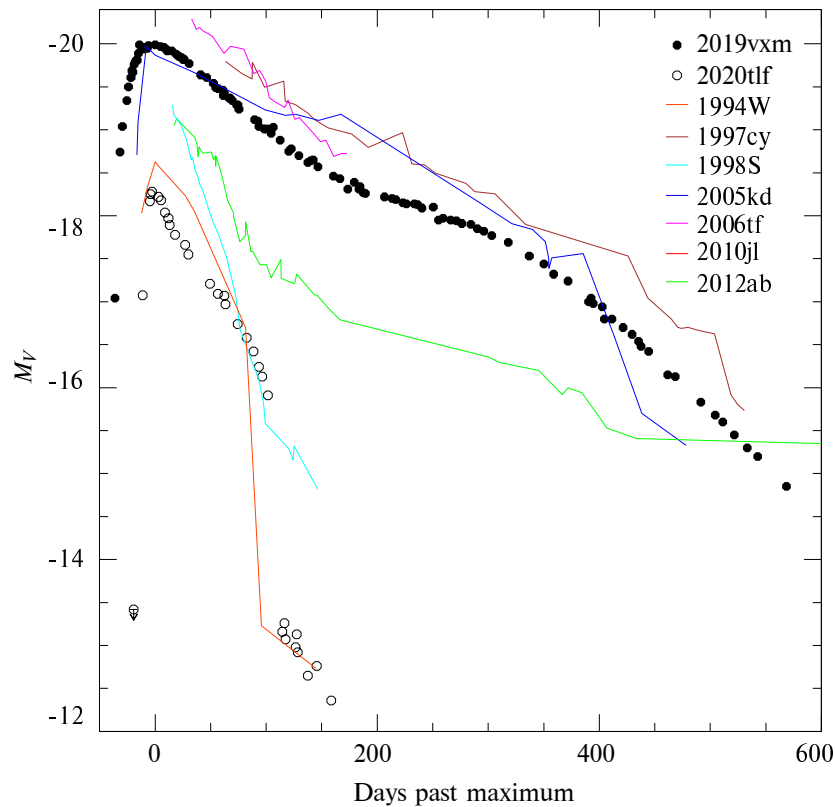


Рис. 20. Кривые блеска SN 2019vxt и SN 2020tlf в абсолютных V -величинах и сравнение с кривыми блеска семи SNe II.

быть представлена лоренцевскими профилями с $FWHM \sim 3200 \text{ км с}^{-1}$.

В спектрах SNe 2019vxt, 2020tlf наблюдались межзвездные линии Na I. Для SN 2019vxt мы зарегистрировали только линии, возникающие в нашей Галактике, эквивалентные ширины линий D1, D2 составили $EW = 0.31, 0.41 \text{ \AA}$. Согласно Poznanski et al. (2012) они соответствуют поглощению $E(B - V) = 0.072, 0.094$, что хорошо согласуется с галактическим поглощением $E(B - V) = 0.09$ по данным Schlafly and Finkbeiner (2011). В спектре SN 2020tlf обнаружены только линии Na I D1, D2 на красном смещении родительской галактики с $EW = 0.11, 0.23 \text{ \AA}$. Соотношения из Poznanski et al. (2012) дают поглощение $E(B - V) = 0.039, 0.032$, мы приняли для SN 2020tlf среднее из этих значений $E(B - V) = 0.035$.

Фотометрический мониторинг осуществлялся на 60-см телескопе КГО и других телескопах ГАИШ, наблюдения SN 2019vxt продолжались 592 дня, SN 2020tlf — 163 дня. Кривые блеска представлены на рис. 18 и 19. Для SN 2019vxt

также нанесены данные Gaia³⁾ и ASAS-SN (Cacella et al., 2019), для SN 2020tlf — результаты Jacobson-Galán et al. (2022).

Наблюдения SNe начались до максимума, который можно определить надежно. В полосе V SN 2019vxt достигла максимума при значении $V_{\max} = 14.75 \pm 0.05$ в JD 2458843.8 \pm 1.0, для SN 2020tlf величина и дата максимума таковы: $V_{\max} = 14.63 \pm 0.05$ и JD 2459119.8 \pm 1.1. Подъем блеска до максимума для SN 2019vxt продолжался около 40 дней, для SN 2020tlf — около 21 дня. Кривые блеска после максимума можно разделить на три этапа. Для SN 2019vxt: быстрое начальное падение, замедление скорости падения, ускорение падения блеска. Длительность двух первых этапов: 188, 150 суток; скорости ослабления блеска в фильтре V : $0.010, 0.0049, 0.012$ в сутки.

Для SN 2020tlf: начальное линейное падение, резкое падение блеска примерно на 2.4 за 15 суток, финальный линейный хвост. Продолжительности первых двух этапов: 103, 15 суток; скорости ослабления блеска в фильтре V : $0.021, 0.019, 0.02$ в сутки.

³⁾<http://gsaweb.ast.cam.ac.uk/alerts/alert/Gaia19fje/>

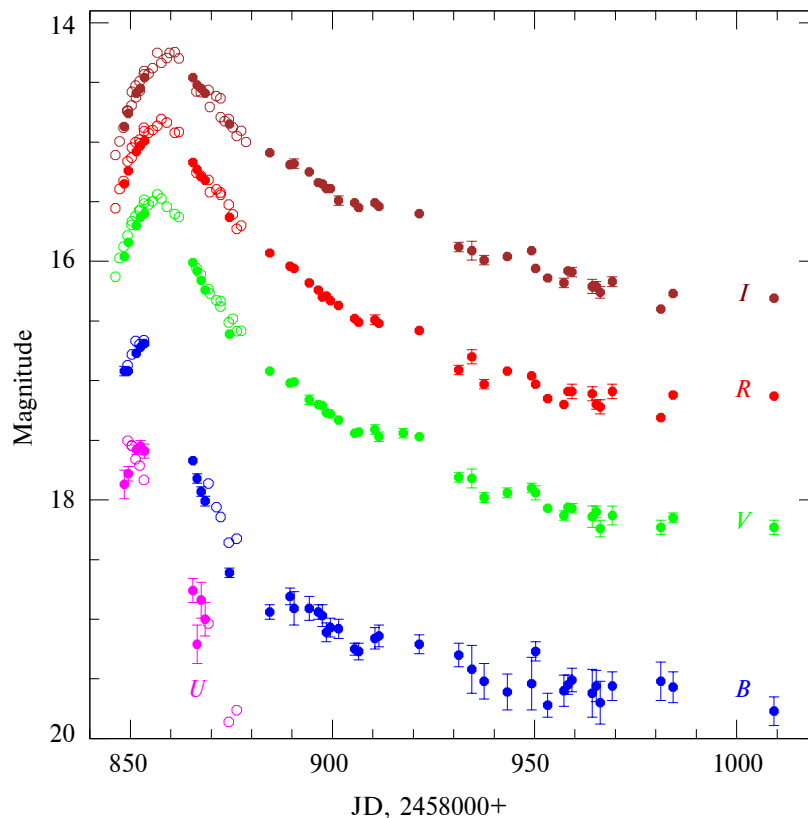


Рис. 21. Кривые блеска SN 2019vuv в фильтрах *UBVRI*. Точки — наши результаты, кружки — данные из литературы.

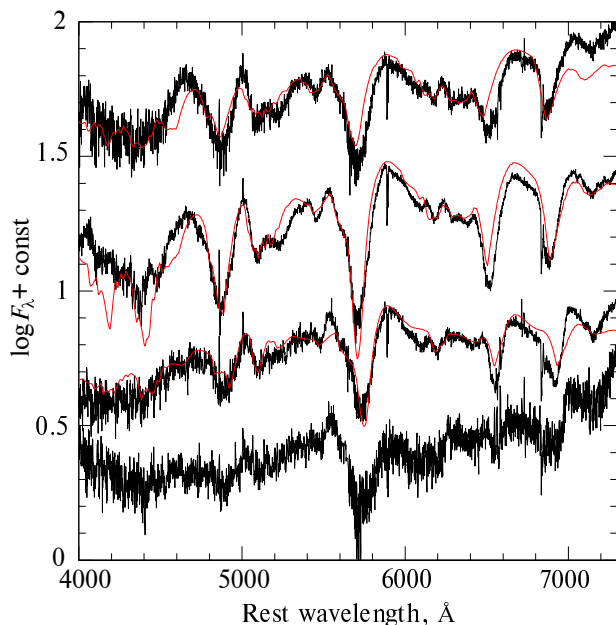


Рис. 22. Спектры SN 2019vuv, полученные в фазах 9, 12, 34 и 54 суток (сверху вниз), исправленные за красное смещение и поглощение света. Черные линии — наблюдаемые спектры, красные — моделирование программой *SYN++*.

Кривые блеска SNe 2019vxt, 2020tlf в абсолютных *V*-величинах показаны на рис. 20, они

сравниваются с кривыми блеска семи SNe II: 1994W, 1997cy, 1998S, 2005kd, 2006tf, 2010jl, 2012ab (Tsvetkov, 1995, 2008; Sollerman et al., 1998; Fassia et al., 2000; Turatto et al., 2000; Smith et al., 2008; Zhang et al., 2012; Tsvetkov et al., 2016; Gangopadhyay et al., 2020). Сравнение показывает, что максимальная светимость и общий характер фотометрической эволюции SN 2019vxt сходен с наблюдавшейся для SNe II 1997cy, 2005kd, 2006tf, 2010jl. Кривая блеска SN 2020tlf больше всего похожа на кривую SN 1994W.

4.2. SN Ib 2019yvr

Нами осуществлены спектроскопические и фотометрические наблюдения SN 2019yvr в галактике NGC 4666. Фотометрия в фильтрах *UBVRI* проводилась на 60-см телескопе RC600 КГО в течение 161 дня, на 2.5-м телескопе КГО было получено четыре спектра в фазах 9, 12, 34 и 54 суток после максимума в фильтре *V*. Кривые блеска показаны на рис. 21, они имеют типичный для SNe Ib вид. Вместе с нашими данными нанесены результаты Kilpatrick et al. (2021). Максимум блеска во всех полосах наступил около JD 2458856, величина $V_{\max} = 15^m44$. SN 2019yvr отличается очень красным цветом ($B - V \sim 1^m1$ даже около максимума

блеска, что свидетельствует о большом поглощении света в родительской галактике. Сравнение кривой цвета ($B - V$) SN 2019ууг с кривыми для четырех SNe Ib с надежно определенным небольшим поглощением позволяет оценить покраснение SN 2019ууг $E(B - V) = 0^m7$. Используя модуль расстояния NGC 4666 $\mu = 30^m8$ (Kilpatrick et al., 2021), найдем абсолютную величину в максимуме $M_V = -17^m56$, что является достаточно характерной величиной для SNe Ib (Richardson et al., 2014).

Спектрограммы показаны на рис. 22, они имеют типичный для SNe Ib вид. Наиболее интенсивные линии в исследованной области спектров поглощения принадлежат гелию, самая сильная — He I $\lambda 5876$. Ясно видно постепенное смещение минимума этой линии в красную сторону, объясняемое движением фотосферы вглубь оболочки, в область более медленного расширения. Оценки скорости по положению минимума: 9000, 8600, 7700 км с⁻¹ для фаз 9, 12, 34 суток соответственно. Спектрограмма для фазы 54 дня недодержана и искажена фоном галактики, оценка по ней невозможна. Такие скорости являются характерными для SNe Ib на данных этапах эволюции. В спектрах надежно зарегистрированы очень сильные межзвездные линии поглощения Na I D2, D1, возникающие в родительской галактике. Их эквивалентные ширины $EW = 1.35, 0.98 \text{ \AA}$, что подтверждает сильное поглощение света SN в галактике. Эти значения EW больше границы применимости соотношений из работы Roznanski et al. (2012). Согласно соотношению из работы Rodríguez et al. (2022) $E(B - V) = 0^m58$, что достаточно хорошо согласуется с величиной, найденной нами по кривым цвета.

Мы осуществили моделирование спектров программой SYN++ (Thomas et al., 2011). Программа рассчитывает спектр на основании набора входных данных, основными являются химический состав, температура, скорость расширения. Сравнение модельного спектра с наблюдаемым позволяет определить или уточнить эти и ряд других параметров, что важно для понимания физической природы данной SN. На рис. 22 показаны результаты моделирования, они достаточно хорошо представляют наблюдаемые спектры. В расчетах учитывались следующие элементы: He I, Fe II, C II, O I, Na I, Ti I. Скорости фотосферы для фаз 9, 12, 34 суток: 9000, 8000, 6000 км с⁻¹, что достаточно хорошо согласуется со скоростями, непосредственно измеренными по смещению абсорбции He I. Температура фотосферы около 4300 К для всех фаз. Наиболее интенсивные линии поглощения около $\lambda 5700$, $\lambda 6500$ и $\lambda 6900$ принадлежат He I, абсорбция около $\lambda 4900$ — бленда линий Fe II, He I, Ti I.

Проведенное исследование показало, что SN 2019ууг является типичным объектом класса Ib, не отличающимся по максимальной светимости, характеру кривых блеска и спектров, скорости расширения оболочки от большинства SNe Ib.

4.3. SN Ia 2020xtz

Для SN 2020xtz в галактике NGC 6574 нами получен пока наибольший объем данных. Фотометрические наблюдения на телескопе RC600 КГО проводились в фильтрах $UBVgri$ в течение 187 суток, на 2.5-м телескопе КГО было получено 33 спектра, охватывающих диапазон фаз от 14 суток до максимума блеска до 93 суток после максимума.

Кривые блеска показаны на рис. 23. Наблюдения начались до максимума, который определяется уверенно: $V_{\max} = 14^m21$, $t_{V\max} = \text{JD } 2459163$. К сожалению, наблюдения были прерваны через 22 суток после максимума из-за соединения объекта с Солнцем и продолжены после фазы 71 суток, когда уже наступил этап финального линейного падения блеска. В полосе V скорость падения блеска на этом этапе составила 0^m019 в сутки. Скорость падения блеска после максимума, которая характеризуется величиной Δm_{15} — величиной ослабления блеска в полосе B за 15 суток после максимума, можно оценить примерно как 1^m0 , что близко к средней величине для SNe Ia.

Кривые цвета SN 2020xtz показывают довольно красный цвет даже в максимуме блеска, что свидетельствует о существенном поглощении света. Сравнение кривой цвета ($B - V$) SN 2020xtz с кривой для нормальной SN Ia 2003du, для которой поглощение практически отсутствует (Stanishev et al., 2007), показывает избыток цвета $E(B - V) = 0^m52$. Приняв такое значение поглощения, стандартное отношение полного поглощения к селективному $R_V = 3.1$ и модуль расстояния $\mu = 32^m4$ по красному смещению галактики NGC 6574 (при $H_0 = 73 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$), найдем абсолютную величину в максимуме $M_V = -19^m8$, что выше средней светимости для нормальных SNe Ia с $\Delta m_{15} \sim 1^m$.

Согласно Schlafly and Finkbeiner (2011) поглощение света в Галактике в направлении NGC 6574 составляет $E(B - V) = 0^m16$, таким образом, согласно нашей оценке, поглощение в родительской галактике примерно в два раза больше галактического и составляет около 0^m36 .

Полученная нами повышенная оценка светимости SN 2020xtz может частично являться следствием неточности определения расстояния по красному смещению для достаточно близкой галактики и меньшего значения R_V в родительской галактике, эти вопросы требуют дальнейшего исследования.

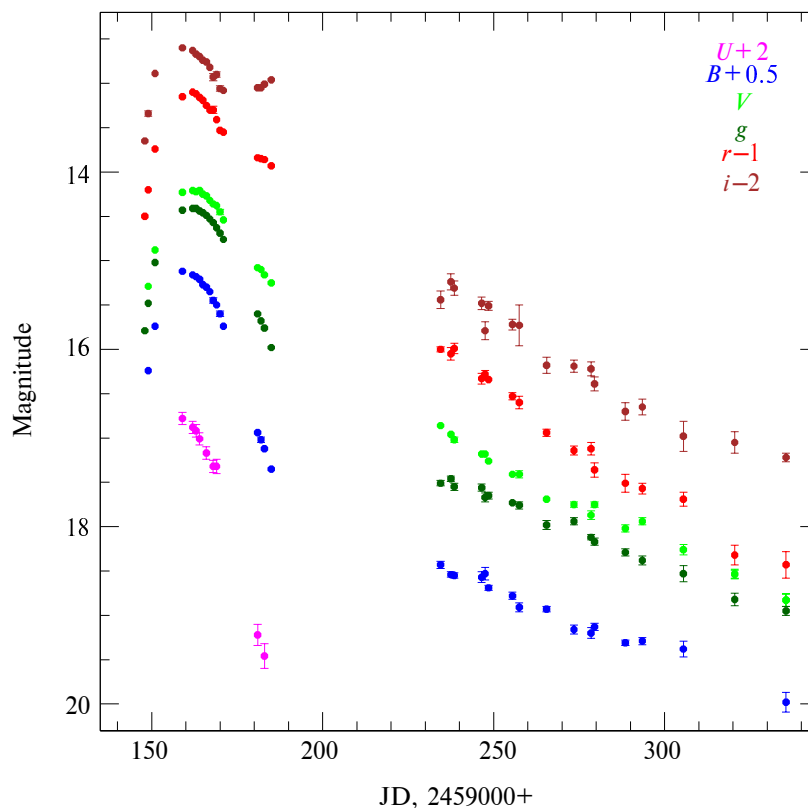


Рис. 23. Кривые блеска SN 2020xtz в фильтрах $UBVgri$.

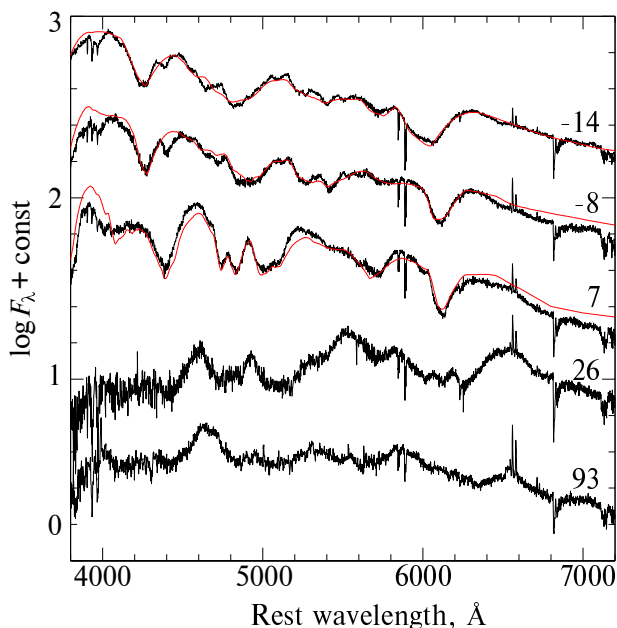


Рис. 24. Спектры SN 2020xtz, фаза в сутках относительно максимума блеска отмечена около каждого спектра. Для первых трех спектров красными линиями показаны модели, рассчитанные с помощью кода SYN++.

Пять спектров SN 2020xtz на разных этапах эволюции представлены на рис. 24. В спектрах

хорошо видны межзвездные линии Na I, причем возникающие как в нашей Галактике, так и в родительской галактике. Эквивалентные ширины линий Na I D2, D1 составляют: в нашей Галактике $EW = 0.43, 0.30 \text{ \AA}$; в родительской галактике $EW = 0.80, 0.72 \text{ \AA}$. Соотношения Poznanski et al. (2012) дают $E(B - V) = 0^m10, 0^m85$ для поглощения в Галактике и в NGC 6574 соответственно. Если первое значение можно считать согласующимся с данными из Schlafly and Finkbeiner (2011), то второе намного превосходит нашу оценку по кривым цвета и приводит к невероятно высокой светимости SN 2020xtz. В то же время соотношения из Rodríguez et al. (2022) дают $E(B - V) = 0^m18, 0^m38$, что отлично согласуется с определенными нами величинами.

Наиболее характерной особенностью спектров SNe Ia на ранних стадиях является абсорбция Si II около $\lambda 6100$. Скорость расширения оболочки, определяемая по смещению минимума линии, составила для фаз $-14, -8, 7$ суток соответственно $14\,000, 11\,500, 10\,600 \text{ км с}^{-1}$. Примерно через месяц после максимума характер спектра изменяется, начинают развиваться эмиссионные пики, отождествляемые с блендами линий Fe II, Fe III, Co II. В целом характер спектральной эволюции

для SN 2020xtz не отличается от типичной для объектов этого класса.

Моделирование с помощью кода SYN++ позволяет хорошо описать спектры на ранней стадии эволюции SN 2020xtz. В расчетах учитывались ионы Si II, Ca II, Mg II, S II, Fe II, Fe III, Na I. Скорость расширения уменьшалась от 15 000 до 12 000 км с⁻¹, температура фотосферы около 10 000 К.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Фотометрические и спектроскопические наблюдения SNe на 2.5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ уже дали достаточно много ценной информации об этих объектах. В сочетании с наблюдениями на других инструментах они позволили построить детальные кривые блеска для SNe 2017egm, 2017eaw, 2018cow, 2018aoq, 2018zd, причем данные с 2.5-м телескопа особенно полезны на поздних стадиях эволюции SNe, когда их блеск ослабевает. Для SNe II-P 2017eaw, 2018aoq построены теоретические кривые блеска с помощью кода STELLA, позволяющего оценить основные физические характеристики SNe. Однако получаемые из расчетов массы предсверхновых систематически больше оценок, полученных на основании непосредственного обнаружения предсверхновых на архивных изображениях. Эта проблема требует дальнейшего исследования.

Несмотря на небольшой объем обработанных до настоящего времени спектроскопических наблюдений SNe, удалось получить интересные результаты. Для SNe IIp 2019vxt и 2020tlf проведено исследование профилей эмиссионных линий, эти данные вместе с кривыми блеска будут использованы для создания моделей этих достаточно редких объектов. SN Ib 2019yvg и SN Ia 2020xtz оказались достаточно типичными представителями своих классов, их спектры хорошо моделируются кодом SYN++, позволяя уточнить химический состав и физические параметры оболочки. В спектрах SNe надежно регистрируются межзвездные линии поглощения Na I D1, D2, что позволяет сравнить разные методы определения межзвездного поглощения света. Хорошие результаты дала осуществлявшаяся в 2020–2021 годах программа оперативной спектроскопической классификации SNe, объектами которой были специально выбранные как наиболее перспективные для дальнейшего изучения SNe. Систематические спектроскопические и фотометрические наблюдения SNe продолжают и должны дать еще много ценных результатов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность сотрудникам ГАИШ, оказавшим помощь в организации наблюдений, принимавших участие в наблюдениях и обработке данных: Н. И. Шатскому, С. А. Потанину, А. В. Додину, К. Е. Атапину, А. М. Татарникову, А. А. Белинскому, О. В. Возяковой, М. А. Бурлак, Н. П. Иконниковой, И. М. Волкову, С. Ю. Шугарову, В. Г. Метлову, В. П. Горанскому, С. В. Жуйко, С. Г. Желтоухову. Работа выполнена с использованием оборудования, приобретенного за счет средств Программы развития Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова. Работа была поддержана Научно-образовательной школой МГУ имени М. В. Ломоносова «Фундаментальные и прикладные исследования космоса». Авторы выражают благодарность за поддержку от Программы развития МГУ имени М. В. Ломоносова.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа В. Ечеистова поддержана Минобрнауки РФ в рамках программы финансирования крупных научных проектов национального проекта «Наука», грант № 075-15-2020-778. Работа П. Бакланова по теоретическому моделированию кривых блеска SNe поддержана грантом РФФИ № 21-11-00362.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. K. Atapin, M. Burlak, A. Gusev, et al., <https://www.wis-tns.org/ads/TNSCR-2020-3742>
2. K. Atapin, M. Burlak, A. Gusev, et al., *Transient* <https://www.wis-tns.org/ads/TNSCR-2020-3756>
3. K. Atapin, A. Dodin, A. Tatarnikov, et al., <https://www.wis-tns.org/ads/TNSCR-2020-3651>
4. K. Atapin, A. Dodin, A. Tatarnikov, et al., <https://www.wis-tns.org/ads/TNSCR-2020-3663>
5. K. Atapin, A. Dodin, A. Tatarnikov, et al., <https://www.wis-tns.org/ads/TNSCR-2020-3698>
6. K. Atapin, A. Dodin, A. Tatarnikov, et al., <https://www.wis-tns.org/ads/TNSCR-2021-2286>
7. K. Atapin, A. Dodin, A. Tatarnikov, et al., <https://www.wis-tns.org/ads/TNSCR-2021-3842>
8. K. Atapin, A. Dodin, D. Tsvetkov, et al., <https://www.wis-tns.org/ads/TNSCR-2021-730>
9. K. Atapin, A. Gusev, A. Dodin, et al., <https://www.wis-tns.org/ads/TNSCR-2020-3786>

10. K. Atapin, S. Lander, O. Voziakova, et al., <https://www.wis-tns.org/ads/TNSCR-2021-566>
11. P. V. Baklanov, S. I. Blinnikov, and N. N. Pavlyuk, *Astronomy Letters* **31** (7), 429 (2005).
12. O. S. Bartunov, D. Y. Tsvetkov, and I. V. Filimonova, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **106**, 1276 (1994).
13. E. C. Bellm, S. R. Kulkarni, T. Barlow, et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **131** (1000), 068003 (2019).
14. S. I. Blinnikov, F. K. Röpkke, E. I. Sorokina, et al., *Astron. and Astrophys.* **453** (1), 229 (2006).
15. S. Blondin and J. L. Tonry, *Astrophys. J.* **666** (2), 1024 (2007).
16. S. Bose, S. Dong, A. Pastorello, et al., *Astrophys. J.* **853** (1), article id. 57 (2018).
17. M. Burlak, A. Dodin, A. Tatarnikov, et al., <https://www.wis-tns.org/ads/TNSCR-2020-3888>
18. M. Burlak, A. Dodin, A. Tatarnikov, et al., <https://www.wis-tns.org/ads/TNSCR-2020-3928>
19. R. J. Buta, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **94**, 578 (1982).
20. R. J. Buta and W. C. Keel, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **487** (1), 832 (2019).
21. P. Caella, I. Cruz, J. Brimacombe, et al., *Astronomer's Telegram* **13326**, 1 (2019).
22. E. Callis, M. Fraser, A. Pastorello, et al., arXiv e-prints astro/ph:2109.12943 (2021).
23. E. Cappellaro, M. Turatto, D. Y. Tsvetkov, et al., *Astron. and Astrophys.* **322**, 431 (1997).
24. T. S. Chonis and C. M. Gaskell, *Astron. J.* **135** (1), 264 (2008).
25. A. De Cia, A. Gal-Yam, A. Rubin, et al., *Astrophys. J.* **860** (2), article id. 100 (2018).
26. L. Dessart and D. J. Hillier, *Astron. and Astrophys.* **439**, 671 (2005).
27. A. Dodin, D. Tsvetkov, N. Shatski, et al., <https://www.wis-tns.org/ads/TNSCR-2020-3627>
28. R. G. Eastman, B. P. Schmidt, and R. Kirshner, *Astrophys. J.* **466**, 911 (1996).
29. A. Elmhamdi, I. J. Danziger, N. Chugai, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **338** (4), 939 (2003).
30. A. Fassia, W. P. S. Meikle, W. D. Vacca, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **318** (4), 1093 (2000).
31. F. Förster, G. Cabrera-Vives, E. Castillo-Navarrete, et al., *Astron. J.* **161** (5), id. 242 (2021).
32. A. Gal-Yam, P. Mazzali, E. O. Ofek, et al., *Nature* **462** (7273), 624 (2009).
33. A. Gangopadhyay, M. Turatto, S. Benetti, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **499** (1), 129 (2020).
34. O. Gottlieb, A. Tchekhovskoy, and R. Margutti, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **513** (3), 3810 (2022).
35. M. Hamuy and P. A. Pinto, *Astrophys. J.* **566**, L63 (2002).
36. D. Hiramatsu, D. A. Howell, S. D. Van Dyk, et al., *Nature Astronomy* **5**, 903 (2021).
37. S. F. Hönig, D. Watson, M. Kishimoto, and J. Hjorth, *Nature* **515**, 528 (2014).
38. G. Hosseinzadeh, E. Berger, B. D. Metzger, et al., arXiv e-prints astro/ph:2109.09743 (2021).
39. C. Inserra, S. J. Smartt, A. Jerkstrand, et al., *Astrophys. J.* **770** (2), article id. 128 (2013).
40. W. V. Jacobson-Galán, L. Dessart, D. O. Jones, et al., *Astrophys. J.* **924** (1), id. 15 (2022).
41. S. W. Jha, K. Maguire, and M. Sullivan, *Nature Astronomy* **3**, 706 (2019).
42. D. Kasen and S. E. Woosley, *Astrophys. J.* **703** (2), 2205 (2009).
43. C. D. Kilpatrick, M. R. Drout, K. Auchettl, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **504** (2), 2073 (2021).
44. R. P. Kirshner and J. Kwan, *Astrophys. J.* **193**, 27 (1974).
45. N. P. M. Kuin, K. Wu, S. Oates, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **487** (2), 2505 (2019).
46. S. Lander, O. Voziakova, A. Dodin, et al., <https://www.wis-tns.org/ads/TNSCR-2021-76>
47. S.-C. Leung, S. Blinnikov, K. Nomoto, et al., *Astrophys. J.* **903** (1), id. 66 (2020).
48. I. Y. Litvinova and D. K. Nadezhin, *Sov. Astron. Letters* **11**, 145 (1985).
49. M. Livio and P. Mazzali, *Physics Reports* **736**, 1 (2018).
50. R. Margutti, B. D. Metzger, R. Chornock, et al., *Astrophys. J.* **872** (1), article id. 18 (2019).
51. M. Modjaz, C. P. Gutiérrez, and I. Arcavi, *Nature Astronomy* **3**, 717 (2019).
52. T. J. Moriya, E. I. Sorokina, and R. A. Chevalier, in *Supernovae. Series: Space Sciences Series of ISSI*, No. 68, Ed. by A. Bykov, C. Roger, J. Raymond, et al. (Springer Netherlands, Dordrecht, 2019), pp. 109–145.
53. M. Nicholl, *Astronomy and Geophysics*, **62** (5), 5.34 (2021).
54. M. Nicholl, E. Berger, S. J. Smartt, et al., *Astrophys. J.* **826** (1), article id. 39 (2016).
55. M. Nicholl, S. J. Smartt, A. Jerkstrand, et al., *Nature* **502** (7471), 346 (2013).
56. D. O'Neill, R. Kotak, M. Fraser, et al., *Astron. and Astrophys.* **622**, id. L1 (2019).
57. N. N. Pavlyuk and D. Y. Tsvetkov, *Astronomy Letters* **42** (8), 495 (2016).
58. C. Pellegrino, D. A. Howell, J. Vinkó, et al., arXiv e-prints astro/ph:2110.15370 (2021).
59. D. A. Perley, P. A. Mazzali, L. Yan, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **484** (1), 1031 (2019).
60. S. A. Potanin, A. A. Belinski, A. V. Dodin, et al., *Astronomy Letters* **46** (12), 836 (2020).
61. D. Poznanski, J. X. Prochaska, and J. S. Bloom, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **426** (2), 1465 (2012).
62. S. J. Prentice, C. Ashall, P. A. James, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **485** (2), 1559 (2019).
63. S. J. Prentice, K. Maguire, S. J. Smartt, et al., *Astrophys. J.* **865** (1), article id. L3 (2018).
64. Y. P. Pskovskii, *Sov. Astron.* **12**, 750 (1969).
65. Y. P. Pskovskii, *Sov. Astron.* **21**, 675 (1977).
66. J. Rho, T. R. Geballe, D. P. K. Banerjee, et al., *Astrophys. J.* **864** (1), L20 (2018).
67. D. Richardson, I. Jenkins, Robert L., J. Wright, and L. Maddox, *Astron. J.* **147** (5), 118 (2014).

68. Ó. Rodríguez, D. Maoz, and E. Nakar, arXiv e-prints astro/ph:2209.05552 (2022).
69. R. Roy, B. Kumar, S. Benetti, et al., *Astrophys. J.* **736** (2), article id. 76 (2011).
70. L. Rui, X. Wang, J. Mo, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **485** (2), 1990 (2019).
71. E. F. Schlafly and D. P. Finkbeiner, *Astrophys. J.* **737**, article id. 103 (2011).
72. N. Shatsky, A. Belinski, A. Dodin, et al., in Proc. All-Russian Conf. on Ground-Based Astronomy in Russia. 21st Century, Nizhny Arkhyz, Russia, 2020, Ed. by I. I. Romanyuk, I. A. Yakunin, A. F. Valeev, and D. O. Kudryavtsev, pp. 127–132 (IP Reshenilenko P.A., Pyatigorsk, 2020).
73. S. J. Smartt, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **47** (1), 63 (2009).
74. S. J. Smartt, *Publ. Astron. Soc. Australia* **32**, id. e016 (2015).
75. N. Smith, R. Chornock, W. Li, et al., *Astrophys. J.* **686** (1), 467 (2008).
76. J. Sollerman, R. J. Cumming, and P. Lundqvist, *Astrophys. J.* **493** (2), 933 (1998).
77. V. Stanishev, A. Goobar, S. Benetti, et al., *Astron. and Astrophys.* **469** (2), 645 (2007).
78. T. Szalai, J. Vinkó, R. Könyves-Tóth, et al., *Astrophys. J.* **876** (1), article id. 19 (2019).
79. R. C. Thomas, P. E. Nugent, and J. C. Meza, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **123** (900), 237 (2011).
80. S. Tinyanont, M. M. Kasliwal, K. Kraiton, et al., *Astrophys. J.* **873** (2), article id. 127 (2019).
81. D. Y. Tsvetkov, *Inform. Bull. Var. Stars* **4253**, 1 (1995).
82. D. Y. Tsvetkov, *Peremennye Zvezdy* **28** (6), 6 (2008).
83. D. Y. Tsvetkov, P. V. Baklanov, M. S. Potashov, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **487** (3), 3001 (2019).
84. D. Y. Tsvetkov, A. A. Belinsky, N. P. Ikonnikova, et al., *Astronomy Letters* **48** (4), 209 (2022).
85. D. Y. Tsvetkov, S. Y. Shugarov, and I. M. Volkov, *Contributions Astron. Obs. Skalnaté Pleso* **46** (2), 87 (2016).
86. D. Y. Tsvetkov, S. Y. Shugarov, I. M. Volkov, et al., *Astronomy Letters* **44** (5), 315 (2018).
87. D. Y. Tsvetkov, A. A. Volnova, A. P. Shulga, et al., *Astron. and Astrophys.* **460** (3), 769 (2006).
88. M. Turatto, T. Suzuki, P. A. Mazzali, et al., *Astrophys. J.* **534** (1), L57 (2000).
89. S. D. Van Dyk, W. Zheng, J. R. Maund, et al., *Astrophys. J.* **875** (2), 136 (2019).
90. O. Voziakova, S. Lander, A. Dodin, et al., <https://www.wis-tns.org/ads/TNSCR-2021-51>
91. K. E. Weil, R. A. Fesen, D. J. Patnaude, and D. Milisavljevic, *Astrophys. J.* **900** (1), id. 11 (2020).
92. D. Xiang, X. Wang, W. Lin, et al., *Astrophys. J.* **910** (1), id. 42 (2021).
93. M. Yamanaka, T. Nakaoka, M. Kawabata, et al., *Astronomer's Telegram* **11526** (2018).
94. D. R. Young, S. J. Smartt, S. Valenti, et al., *Astron. and Astrophys.* **512**, id. A70 (2010).
95. W. Yuan, M. M. Fausnaugh, S. L. Hoffmann, et al., *Astrophys. J.* **902** (1), 26 (2020).
96. J. Zhang, X. Wang, V. József, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **498** (1), 84 (2020).
97. T. Zhang, X. Wang, C. Wu, et al., *Astron. J.* **144** (5), 131 (2012).
98. S. Zheltoukhov, A. Dodin, A. Tatarnikov, et al., <https://www.wis-tns.org/ads/TNSCR-2020-3946>
99. J. Zhu, N. Jiang, S. Dong, et al., arXiv e-prints astro/ph:2303.03424 (2023).

Progress in Supernovae Studies with the 2.5-m telescope at the Caucasus Mountain Observatory of SAI MSU

D. Yu. Tsvetkov¹, N. N. Pavlyuk¹, V. A. Echeistov¹, P. V. Baklanov^{2,3,4}

¹Sternberg Astronomical Institute, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119234 Russia

²National Research Center “Kurchatov Institute”, Moscow, 117218 Russia

³Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119333, Russia

⁴Keldysh Institute of Applied Mathematics, Russian Academy of Sciences, Moscow, 125047 Russia

We present photometric and spectroscopic observations of supernovae carried out with the 2.5-m telescope at the Caucasus Mountain Observatory of SAI MSU. The light curves for the objects 2017egm, 2017eaw, 2018cow, 2018aoq, 2018zd, 2019yvr, 2019vxx, 2020tlf, and 2020xtz were constructed and their basic parameters were determined. The observed light curves are compared to the theoretical calculations for SNe II-P 2017eaw and 2018aoq. The spectra of SNe 2019vxx, 2019yvr, 2020tlf, 2020xtz are presented. The profiles of emission lines are studied for SNe II 2019vxx and 2020tlf. Spectral modeling was carried out for SNe 2019yvr and 2020xtz. The results of the program of prompt SNe spectral classification for eight objects are reported.

Keywords: *supernovae*